

상변화물질을 충전한 구형 캡슐의 축냉 특성

윤홍선 권진경 정 훈 이현동 김영근

Cold Thermal Energy Storage Characteristics of Spherical PCM Capsule

H. S. Yun J. K. Kwon H. Jeong H. D. Lee Y. K. Kim

Abstract

The freezing characteristics of two kinds of phase change materials (PCM) encapsulated in a spherical container were investigated with various cooling air temperatures and velocities. The super cooling and solidification time of PCM were highly affected by cooling air temperature and velocity. The experimental equations are derived to express total solidification time of the PCM in terms of Nusselt number and dimensionless temperature.

Keywords : PCM (Phase Change Material), Cold thermal energy storage, Capsule

1. 서론

최근에 CFC에 의한 오존층 파괴, CO₂ 배출에 따른 지구 온난화 및 각종 환경오염 물질의 배출에 따른 자연환경 파괴 등과 같은 환경문제가 범세계적 공동대처 과제로 대두되면서, 각종 에너지원의 효율적, 합리적, 환경 친화적 이용이 국가경제 전반에 매우 큰 영향력(무역규제, 탄소세 등)을 갖게 되었고, 이에 따라 선진국을 중심으로 열에너지의 저장·변환·이용기술에 관한 다양한 기술이 적극적으로 도입되고 있다.

상변화물질(PCM)을 이용한 에너지 저장 기술은 다양한 형태의 에너지를 PCM의 잠열특성을 이용하여 고농도로 저장하여 사용분야, 시기 및 목적에 적합하게 변환·이용하는 기술을 의미한다.

PCM을 이용하는 축냉시스템은 열저장 밀도가 현열 저장 시스템 보다 크므로 부피와 무게를 줄일 수 있고 일정한 작동 온도에서 축·방냉을 할 수 있는 장점이 있으나, 축냉시스템으로 사용하기 위해서는 사용목적에 적합한 축냉방식을 선택하여야 한다. PCM을 이용한 축냉방식으로는 캡슐형, 관내(외)

착빙형, 빙박리형, 슬러리형 등이 있으며, 이들 중 구조가 간단하고 그 성능이 여러 현장에서 입증된 캡슐형과 관외착빙형이 가장 많이 보급되어 있다. 강(2000)에 의하면 캡슐형은 초기 투자비용이 코일형 보다 다소 높지만 방냉효율이 우수하고 방냉온도가 낮아 냉각부하가 커질수록 경제성이 있으며, 슬러리형은 시스템이 복잡하여 초기 시설비가 높은 단점이 있으나, 부하응답성이 빠른 장점이 있다고 하였다. Saitoh 등(1986), Laybourn(1988), Kousksou 등(2005)은 구형캡슐이 평판형, 켈리컬코일형, 원통형 등의 다른 축열방식 보다 전열면적이 커서 열저장 성능이 우수하고, 시스템 내 장착이 용이하며, 시스템 형상에 영향을 받지 않아 시공 및 관리가 편리하다는 장점들이 있다고 하였다.

PCM을 이용하는 축냉시스템에서 PCM의 과냉각과 축냉 소요시간은 축냉시스템의 효율에 영향을 미치므로 축냉시스템의 설계에 있어서 과냉각이 발생되지 않는 열교환 매체의 온도 및 유속과 축냉에 소요되는 시간을 구명하는 것이 필요하다. 정 등(1994)은 PCM을 충전한 직경 24.51 mm의 구형 캡슐을 항온조 내에 설치하고 축냉과정에서의 캡슐 내 PCM

This work was financially supported by Agricultural R&D promotion Center (ARPC). The article was submitted for publication on 2008-09-03, reviewed on 2008-09-22, and approved for publication by editorial board of KSAM on 2008-10-02. The authors are Hong Sun Yun, Senior Research Scientist, Jin Kyung Kwon, Research Scientist, Hoon Jeong, Research Scientist, Hyun Dong Lee, Research Scientist, and Young Geon Kim, Research Scientist, National Institute of Agricultural Engineering, RDA, Suwon. Corresponding author: H. S. Yun, Senior Research Scientist, National Institute of Agricultural Engineering, RDA, Suwon, 441-707, Korea; E-mail: <hsyoon@rda.go.kr>.

의 상변화 과정과 온도변화를 측정하였으며, 열매체의 유량이 일정할 때는 열매체의 온도가 낮을수록, 열매체의 온도가 일정할 때는 열매체의 유량이 클수록 축냉시간이 짧아졌고 과냉각 발생빈도와 과냉각 지속시간도 감소되었다고 하였다. Saitoh 등(1986)은 캡슐형 축냉시스템의 성능에 영향을 주는 주요인들은 캡슐의 직경, 열교환 매체의 유속과 온도 및 캡슐의 재질이라고 하였다. Kousksou 등(2005)은 물은 높은 잠열과 안전성, 무공해성 및 공기조화기와의 호환성 등의 측면에서 유리하여 PCM으로 널리 사용되지만 축냉과정에서의 과냉각 현상이 가장 큰 문제점이고, 효율적인 이용을 위해서는 과냉각 현상에 대한 고려가 필요하다고 하였다. Levent Bilir 등(2005)은 PCM을 충전한 원통형 및 구형 캡슐의 무차원 축냉시간을 Stefan number, Biot number 및 무차원의 과냉각 매개변수를 사용하는 방정식으로 나타내었다.

본 연구에서는 농산물의 저온유통 시설에 이용할 수 있는 공기 열교환 방식의 축냉시스템을 개발하기 위하여 PCM이 충전된 축냉 캡슐을 개발하여 축냉에 사용되는 공기의 온도와 유속에 따른 PCM의 과냉각 발생 여부 및 축냉 소요시간을 조사하였다. 또한 집중용량법을 사용하여 축냉 소요시간을 예측하기 위한 모델식을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

가. PCM 캡슐

본 연구에서 제작한 PCM 캡슐의 외피는 두께 1 mm의 HDPE (High density polyethylene)재질이며, 직경이 54 mm인 구형으로 제작하였다.

캡슐에 주입한 PCM은 상변화온도가 -4.5°C이고, 잠열량이 287.5 J/kg인 것(S₁)과 상변화온도가 0.0°C이고, 잠열량이 333.4 J/kg인 것(S₂)의 두 종류이다. 캡슐에 주입한 PCM의 양은 축열시 캡슐 내부에서의 체적변화를 고려하여 주입하였으며, PCM 주입량은 S₁은 67 g ± 3%, S₂는 60 g ± 3%이었다.

나. PCM 캡슐의 축냉시험 장치

PCM캡슐의 축냉특성을 시험하기 위하여 그림 1과 같이 캡슐 챔버, 송풍기, 송풍량 측정기, 온도 측정기 및 항온실로 구성된 실험장치를 제작하였다. 캡슐 챔버는 400(L) × 400(W) × 400(H) mm의 크기로 제작하였고, 챔버를 통과하는 공기 온도와 축냉캡슐의 중심온도를 측정하기 위한 센서를 설치하였다. 송풍기는 풍량 80 m³/min., 정압 580 Pa의 축류송풍기를 사용하였으며, 배관(135(φ) × 2,000(L) mm, P.V.C.관)으로 캡슐 챔버와 연결하였고, 변압기를 사용하여 송풍기의 회

전수를 변화시켜 송풍량을 조절할 수 있도록 제작하였다. 항온실은 100 mm 두께의 폴리우레탄으로 단열처리하였고, 온도는 온도조절기로 설정온도와 고내 온도를 비교하여 냉동기를 작동 또는 정지시켜 조절하도록 제작하였으며, 온도 편차는 ±0.5°C이내이었다.

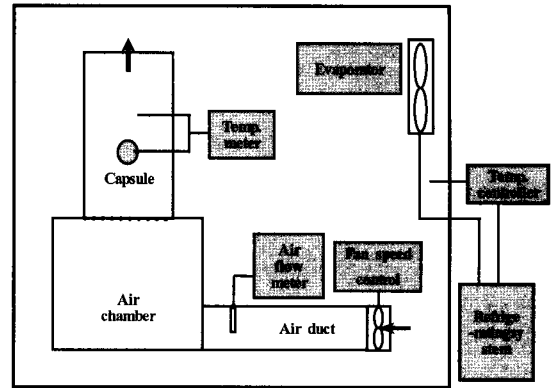


Fig. 1 Diagram of experimental setup.

PCM 캡슐의 축냉특성을 조사하기 위하여 PCM 캡슐은 캡슐 챔버의 중앙에 설치하고 냉동기와 송풍기를 작동시켜 항온실의 온도와 풍속을 변화시키며 실험하였다. 캡슐 내부 잠열재의 온도와 캡슐을 통과하는 공기의 온도는 캡슐 중앙부 및 캡슐 챔버 내에 ±0.2°C 정밀도의 직경이 2 mm인 Pt 100 Ω 센서를 설치하여 30초 간격으로 측정하였다. 풍속은 공기 유입관의 풍속을 디지털 마이크로 마노메타(Model FCO12, Furness Controls LTD, 영국)로 측정하여 캡슐 챔버의 풍속으로 환산하여 사용하였다.

다. 축냉시간 예측

PCM 캡슐에 저온의 냉각공기를 불어 축냉시키는 것은 캡슐-공기 계면에서 일어나는 대류열전달에 기인하는 과도열전도에 해당되며, 과도적인 프로세스 동안 캡슐 온도의 시간중속성은 집중용량법을 사용하여 구할 수 있다. 집중용량법의 정의에 따라 캡슐 내의 온도구배는 무시하였고 캡슐의 온도하강은 캡슐과 공기 사이의 대류열전달에 의해 일어나는 것으로 가정하였다. 이에 따라 캡슐의 축냉소요시간은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$t = -\frac{\rho C_p D}{6h} \ln\left[\frac{T - T_a}{T_i - T_a}\right] \quad (1)$$

$$h_a = N \frac{k}{D} \quad (2)$$

여기서, t : 축열에 소요되는 시간(min)

h_a : 대류열전달계수(W/m²K)

- ρ : PCM 밀도(kg/m³)
- C_p : PCM의 비열(J/kgK)
- D : 캡슐의 직경(m)
- Nu : Nusselt수
- k : 공기의 열전도율(W/mK)
- T_i : 캡슐 초기온도(K)
- T : 축냉 종료시 캡슐 온도(K)
- T_a : 냉각공기 온도(K)

식 (1)과 식 (2)로부터 축냉 소요시간 t 는 식 (3)과 같이 Nusselt수와 무차원온도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$t = f(N, \theta) \tag{3}$$

여기서, θ : 무차원온도(= $T - T_a / T_i - T_a$)

구 표면에서의 대류열전달에 따른 Nusselt수는 Whitakar (1972)가 제시한 아래의 식 (4)를 사용하여 구하였다.

$$N = 2 + (0.4Re^{1/2} + 0.06Re^{2/3}) Pr^{0.4} (\frac{\mu_a}{\mu_s})^{1/4} \tag{4}$$

단, $0.71 < Pr < 380$, $3.5 < Re < 7.6 \times 10^4$, $1.0 < (\frac{\mu_a}{\mu_s}) < 3.2$

- 여기서, Re : Reynolds수
- Pr : Prandtl수
- μ_a : 냉각공기의 동점성계수(N.s/m²)
- μ_s : 캡슐 평균온도에 대한 공기의 동점성계수(N.s/m²)

3. 결과 및 고찰

가. PCM 캡슐의 축냉특성

1) 자연대류 축냉

S₁ PCM과 S₂ PCM을 주입한 캡슐을 자연대류 상태에서 축냉시킬 때 냉각공기 온도에 따른 캡슐 중심부의 온도변화를 각각 그림 2와 그림 3에 나타내었다.

S₁ PCM을 주입한 캡슐은 냉각공기 온도를 -5.3℃와 -6.3℃로 했을 때 PCM의 온도가 상변화 과정을 거치지 않고 냉각공기 온도까지 하강하는 과냉각 현상을 나타내어 잠열축냉이 이루어지지 않았다. 냉각공기 온도를 -7.4℃로 했을 때는 축냉이 시작된 후 346분 만에 PCM의 온도가 -7.0℃까지 하강하여 과냉각을 나타낸 후 다시 상변화 온도까지 상승되어 333분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 온도를 -8.1℃로 했을 때는 축냉이 시작된 후 134분 만에 PCM의 온도가 과냉

각 없이 상변화 온도까지 하강한 후에 130분 동안 잠열축냉이 이루어졌다.

따라서 S₁ PCM을 주입한 캡슐을 자연대류 상태에서 축냉시킬 때 잠열축냉이 가능한 공기의 온도는 -7.4℃ 이하였고, 냉각공기의 온도가 낮을수록 과냉각 및 축열에 소요되는 시간이 짧아졌다.

S₂ PCM을 주입한 캡슐은 냉각공기 온도를 -1.3℃로 했을 때 PCM의 온도가 상변화과정을 거치지 않고 냉각공기 온도까지 하강하는 과냉각 현상을 나타내어 잠열축냉이 이루어지지 않았다. 냉각공기 온도를 -2.9℃로 했을 때는 축냉이 시작된 후 1,048분 만에 PCM의 온도가 -2.0℃까지 떨어져 과냉각을 나타낸 후 다시 상변화 온도까지 상승되어 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 온도를 -5.1℃로 했을 때는 축냉이 시작된 후 211분 만에 PCM의 온도가 -2.5℃까지 과냉각된 후 상변화 온도까지 상승되어 1,318분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 온도를 -6.3℃로 했을 때는 축냉이 시작된 후 211분 만에 PCM의 온도가 -3.3℃까지 과냉각된 후 상변화 온도까지 상승되어 1,053분 동안 잠열축냉이 이루어졌다.

따라서 S₂ PCM을 주입한 캡슐을 자연대류 상태에서 축냉

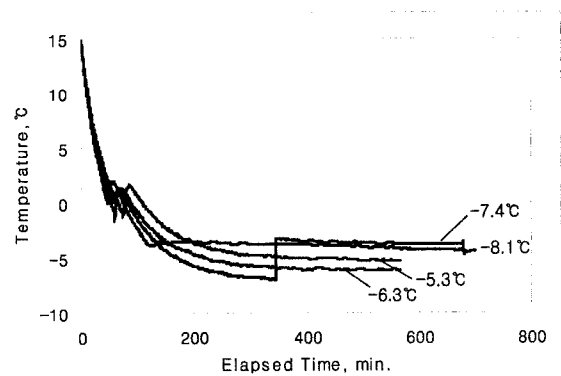


Fig. 2 Variation of center temperature of S₁ PCM capsule with time by natural convection cooling.

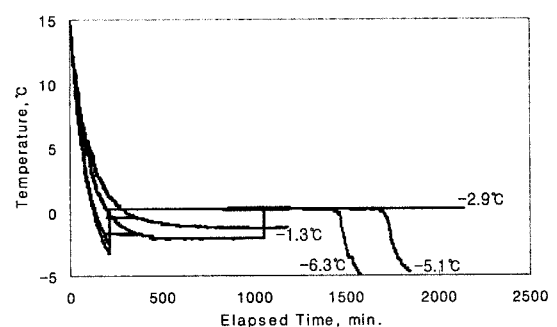


Fig. 3 Variation of center temperature of S₂ PCM capsule with time by natural convection cooling.

시킬 때 잠열축냉이 가능한 온도는 -2.9°C 이하였고, 냉각공기의 온도가 낮을수록 과냉각 및 축냉에 소요되는 시간이 짧아졌다.

2) 강제대류 축냉

가) 냉각공기 온도의 영향

S_1 PCM을 주입한 캡슐을 냉각공기의 풍속을 1.7 m/s 로 고정하고 축냉시킬 때 냉각공기 온도에 따른 캡슐 내의 PCM의 온도변화를 그림 4에 나타내었다.

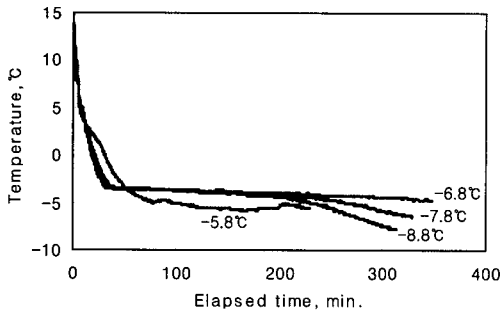


Fig. 4 Variation of center temperature of S_1 PCM capsule with time by forced air cooling ($V = 1.7\text{ m/s}$).

S_1 PCM을 주입한 캡슐에서 냉각공기 온도를 -5.8°C 로 했을 때는 PCM의 온도가 상변화 과정을 거치지 않고 냉각공기 온도까지 하강하는 과냉각 현상을 나타내었다. 냉각공기 온도를 -6.8°C 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 39분 만에 PCM의 온도가 과냉각 없이 상변화 온도까지 하강된 후 45분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 온도를 -7.8°C 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 42분 만에 PCM의 온도가 과냉각 없이 상변화 온도까지 하강되어 42분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 온도를 -8.8°C 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 34분 만에 PCM의 온도가 과냉각 없이 상변화 온도까지 하강되어 41분 동안 잠열축냉이 이루어졌다.

따라서 S_1 PCM을 주입한 캡슐을 냉각공기의 풍속을 1.7 m/s 로 고정하고 축냉시킬 때 축냉이 가능한 온도는 -6.8°C 이하였고, 냉각공기의 온도가 낮을수록 축냉 소요시간이 짧아졌으며, 자연대류 축냉에 비하여 과냉각 및 축냉 소요시간이 현저하게 줄어들었다.

S_2 PCM을 주입한 캡슐을 냉각공기의 풍속을 2.2 m/s 로 고정하고 축냉시킬 때 냉각온도에 따른 축냉캡슐 내의 PCM의 온도변화를 그림 5에 나타내었다.

냉각공기 온도를 -1.9°C 로 했을 때 PCM의 온도는 상변화 과정을 거치지 않고 냉각공기 온도까지 하강하여 과냉각 현

상을 나타내었다. 냉각공기 온도를 -2.7°C 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 23분 만에 PCM의 온도가 -1.6°C 까지 과냉각된 후 상변화 온도까지 상승되어 253분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 온도를 -3.8°C 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 32분 만에 PCM의 온도가 -3.1°C 까지 과냉각된 후 상변화 온도까지 상승되어 221분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 온도를 -5.1°C 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 15분 만에 PCM의 온도가 과냉각 없이 상변화 온도까지 하강된 후 153분 동안 잠열축냉이 이루어졌다.

따라서 S_2 PCM을 주입한 캡슐을 냉각공기의 풍속을 2.2 m/s 로 고정하고 축냉시킬 때 축냉이 가능한 온도는 -2.7°C 이하였고, 냉각공기의 온도가 낮을수록 축냉 소요시간이 짧아졌으며, 자연대류 축냉에 비하여 과냉각 및 축냉 소요시간이 현저하게 줄어들음을 알 수 있었다.

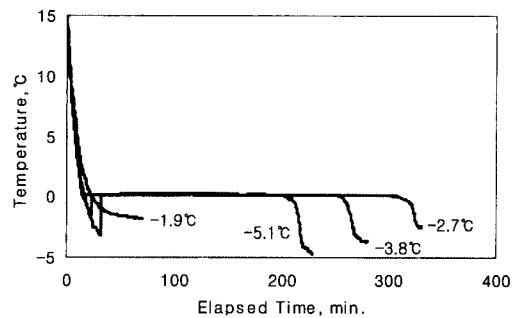


Fig. 5 Variation of center temperature of S_2 PCM capsule with time by forced air cooling ($V = 2.2\text{ m/s}$).

나) 냉각공기 유속의 영향

S_1 PCM을 주입한 캡슐을 냉각공기의 온도를 -8.8°C 로 고정하고, 풍속을 변화시키며 축냉시킬 때의 캡슐 내의 PCM의 온도변화를 그림 6에 나타내었다.

냉각공기 풍속을 0.7 m/s 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 46분 만에 PCM의 온도가 상변화 온도까지 하강된 후에 128분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 풍속을 1.1 m/s 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 36분 만에 PCM의 온도가 상변화 온도까지 하강된 후에 80분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 풍속을 1.7 m/s 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 34분 만에 PCM의 온도가 상변화 온도까지 하강된 후 41분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 풍속을 2.2 m/s 로 했을 때는 축냉이 시작된 후 31분 만에 PCM의 온도가 상변화 온도까지 하강된 후에 19분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 시험범위 내에서 과냉각은 나타나지 않았으며 냉각공기의 풍속을 증가시키기에 따라 축냉에 소요되는 시간은 짧아졌다.

S₂ PCM을 주입한 캡슐을 냉각공기의 온도를 -5.0℃로 고정하고, 풍속을 변화시키며 축냉시킬 때의 캡슐 내의 PCM의 온도변화를 그림 7에 나타내었다.

냉각공기 풍속을 0.7 m/s로 했을 때는 축냉이 시작된 후 37분 만에 PCM의 온도가 상변화 온도까지 하강된 후에 363분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 풍속을 1.1 m/s로 했을 때는 축냉이 시작된 후 31분 만에 PCM의 온도가 상변화 온도까지 하강된 후에 282분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 풍속을 1.7 m/s로 했을 때는 축냉이 시작된 후 18분 만에 PCM의 온도가 상변화 온도까지 하강된 후에 218분 동안 잠열축냉이 이루어졌다. 냉각공기 풍속을 2.2 m/s로 했을 때는 축냉이 시작된 후 15분 만에 PCM의 온도가 상변화 온도까지 하강된 후에 153분 동안 잠열 축냉이 이루어졌다. 시험범위 내에서 과냉각은 나타나지 않았으며 냉각공기의 풍속을 증가시킴에 따라 축열에 소요되는 시간은 짧아졌다.

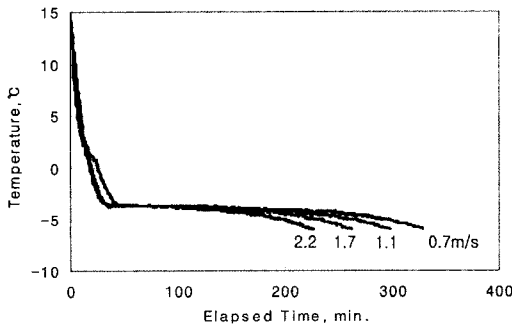


Fig. 6 Variation of center temperature of S₁ PCM capsule with time by forced air cooling (air temp. = -8.8℃).

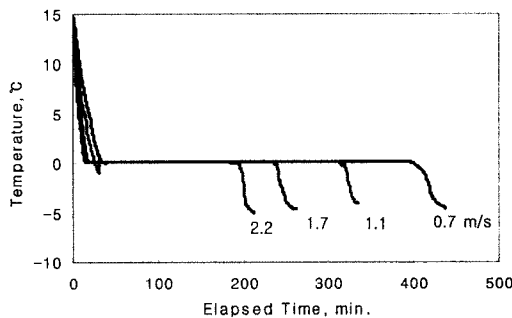


Fig. 7 Variation of center temperature of S₂ PCM capsule with time for forced air cooling (air temp. = -5.0℃).

나. 축냉 소요시간 예측

축냉에 소요되는 시간을 예측하기 위하여 Whitakar(1972)가 제시한 상관관계식을 사용하여 계산한 구 표면에서의 Nusselt

수와 무차원온도의 함수로 표시되는 실험식을 작성하였다.

S₁ 축냉캡슐의 축냉 소요시간 t₁은 식 (5)와 같이 나타났으며, 결정계수(R²)는 0.978이었다.

$$t_1 = 83434.7(\text{Nu})^{-1.93093}\theta^{0.312302} \quad (R^2 = 0.978^{**}) \quad (5)$$

S₂ 축냉캡슐의 축냉 소요시간 t₂는 식 (6)과 같이 나타났으며, 결정계수(R²)는 0.950이었다.

$$t_2 = 10562.8(\text{Nu})^{-1.33476}\theta^{0.969351} \quad (R^2 = 0.950^{**}) \quad (6)$$

이상의 과정을 통하여 본 연구에서 개발한 PCM 캡슐을 공기를 열교환 매체로 하여 축냉시킬 때 냉각공기 온도와 풍량에 따른 축냉 소요시간의 예측이 가능한 실험식을 얻을 수 있었다.

4. 요약 및 결론

농산물의 저온유통 시설에 이용할 수 있는 공기 열교환 방식의 축냉시스템을 개발하기 위하여 PCM을 충전한 축냉 캡슐을 개발하고 축냉에 사용되는 공기의 온도와 유속에 따른 PCM의 과냉각 발생 여부 및 축냉 소요시간을 조사하였다. 또한 집중용량법을 사용하여 축냉 소요시간을 예측하기 위한 실험식을 제시하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PCM 캡슐을 자연대류 조건에서 축냉시킬 때 잠열축냉이 가능한 온도는 S₁ PCM을 주입한 캡슐은 -7.4℃ 이하, S₂ PCM을 주입한 캡슐은 -2.9℃ 이하였으며, 강제대류 조건에서는 축냉 가능 온도가 조금 높아지는 경향을 나타내었다.
- (2) PCM 캡슐의 과냉각 및 축냉에 소요되는 시간은 냉각공기의 풍속과 온도에 크게 영향을 받았으며, 풍속이 크고 온도가 낮을수록 줄어드는 경향을 나타내었다.
- (3) PCM 캡슐을 공기를 열교환 매체로 하여 축냉시킬 때 냉각공기 온도와 풍량에 따른 축냉 소요시간을 Nusselt 수와 무차원온도를 변수로 하여 예측하는 것이 가능하였으며, 다음과 같은 실험식으로 나타낼 수 있었다.

S₁ 축냉캡슐의 축냉 소요시간 :

$$t_1 = 83434.7(\text{Nu})^{-1.93093}\theta^{0.312302} \quad (R^2 = 0.978^{**})$$

S₂ 축냉캡슐의 축냉 소요시간 :

$$t_2 = 10562.8(\text{Nu})^{-1.33476}\theta^{0.969351} \quad (R^2 = 0.950^{**})$$

참 고 문 헌

1. Kousksou, T., J. P. Bedecarrats, J. P. Dumas and A. Mimet. 2005. Dynamic modeling of the storage of an encapsulated ice tank. *Applied Thermal Engineering* 25:1534-1548.
2. Laybourn, D. R. 1988. Thermal energy storage with encapsulated ice. *ASHRAE Trans.* 94:1971-1988.
3. Levent Bilir and Zafer Ilken. 2005. Total solidification time of liquid phase change material enclosed in cylindrical/spherical containers. *Applied Thermal Engineering* 25:1488-1502.
4. Saitoh, T. and K. Hirose. 1986. High-performance phase-change thermal energy storage using spherical capsules. *Chem. Eng. Comm.* 41:39-58.
5. Whitaker, S. 1972. Forced convection heat transfer correlations for flow in pipes, past flat plates, single cylinders, single spheres, and for flow in packed beds and tube bundles. *AIChE Journal* 18(2):361-371.
6. 강한기. 2000. 빙축열 냉방시스템의 선정과 설계. *공기조화·냉동공학회 2000하계학술발표논문집*. pp. 853-868.
7. 정갑용, 조금남. 1994. 상변화 물질들을 이용한 구형캡슐 축냉 시스템의 축냉특성 연구. *공기조화·냉동공학회 1994동계학술발표논문집*. pp. 40-45.